

Dynamic Bearing의 초정밀 ECM 가공 특성에 관한 연구

신현정*, 김영민(인하대 대학원 기계공학과), 이은상(인하대 기계공학과)

A study on the Ultra precision ECM for Dynamic bearing

H. J. Shin(Mecha. Eng. IHU), Y. M. Kim(Mecha. Eng. IHU), E. S. Lee(Mecha. Eng. IHU)

ABSTRACT

In this paper a mathematical model, the results of computer simulation and experimental investigations of electrochemical machining with a two-electrode are presented. The experimental investigations were carried out in order to evaluate the influence of working voltage, initial interelectrode gap size, and metal remove rate.

Accuracy of computer simulation evaluated by differences between results of experimental test and computer simulation depends on electrochemical machining coefficient, total overpotential of electrode process, current density, electrical conductivity of electrolyte, and etc. Metal removal rate would be predicted by the simulation of ECM process.

Key Words : ECM(Electrochemical machining 전해가공), current density(전류밀도), PEMM(Pulse Electrochemical Micromachining 펄스 전해마이크로 가공), overpotential(과전압)

1. 서론

산업이 발전하면서, 소형화, 고속화, 저가화의 시스템이 필요하게 되면서, 그에 따라 기존의 가공법에서 탈피한 새로운 가공방식이 대두되고 있다.⁽¹⁾ 전해연마 가공(Electrochemical machining, ECM)도 이러한 가공 방법으로 기존의 기계가공으로 어려운 부분을 고 효율로 가공하는 기술이다. 이러한 전기 화학 가공기술은 그 기본원리상 버의 제거, 표면 잔류 응력 제거, 피가공물의 기계적 성질에 제한을 받지 않으며, 공구의 마모가 전혀 없기 때문에 자동차, 항공기, 터빈등의 산업분야에 사용되고 있다.⁽²⁾

하지만, 이러한 가공기술이 소개 되면서도, 그 가공 결과, 즉 가공깊이 및 형상등을 이론적으로 예측할 수 있는 연구결과는 아직 미미한 것이 현실이다. 또한 초정밀 가공을 위한 펄스전해 마이크로 가공(Pulse Electrochemical Micromachining, PEMM)에 대한 이론적 해석이 부족한 것이 사실이다. 실제로 이러한 문제로 인해 Dynamic bearing의 그루브 가공 시 설계와 동일한 가공결과를 만들기에는 어려운 부분이 많다. 수 마이크로미터의 오차가 있어도 베어링 기동 시 부상력에서는 많은 차이가 발생되기 때문에

더욱 정밀한 제어가 필요하다.

본 연구에서는 여러 가공 파라미터를 수식으로 선형화 하여, PEMM 가공 깊이와 형상을 예측하는 프로그램을 구현해 보고자 한다.

2. 이론적인 배경

2.1 미세 전해가공의 이론적 금속제거량

패러데이 법칙(Faraday's law)에 의해 전해가공 시 제거되는 금속량은 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁾

$$m = \frac{AIt}{zF} \tag{1}$$

A:atomic weight

I :current

t :mechinig time

z :valency

F :Faraday's constant(96500C)

여기서 $\frac{A}{z}$ 는 등가전기화학량(electrochemical equivalent)라 하여 전해가공 시 중요한 파라메타가

된다. 식(1)에서 부피의 제거량으로 나타내면 다음과 같다.⁽³⁾

$$V_{tot} = \frac{A}{zF\rho} \times I \times t \quad (2)$$

여기서 $A/zF\rho$ 항은 비체적 금속제거(specific metal removal)를 나타낸다. 체적 금속 제거량에서 가공 깊이를 측정하고자 할 때는 전류밀도 개념을 도입하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V_f = \eta V_{spec} J \quad (3)$$

V_{spec} : specific metal removal
 J : current density

효율(η)은 이론적인 제거량과 실제 제거량을 비교하는 값이 된다. 이 효율은 전류효율과 전해액의 효율이 있다. 이번 시뮬레이션에서는 이 효율을 100%라고 가정하여, 시뮬레이션 값과 실제 가공값의 비를 이용하여 효율을 계산해 보았다.

2.2 미세 전해가공의 전류밀도

옴의 법칙(Ohm's law)에 따라 전류밀도(current density) J 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$J = \frac{(U_{proc} - U_{pol})k}{h} \quad (4)$$

U_{proc} : Applied voltage
 U_{pol} : Polarisation voltage(overpotential)
 h : inter-electrode gap
 k : Electrolyte conductivity

위의 식의 과전압(overpotential)값은 전극반응의 불가역성을 나타내는 척도라고 볼 수 있다. 일반적인 ECM가공법이 비가역반응이므로 Applied voltage가 모두 전류밀도에 적용되지 않는다고 볼 수 있으며, 이 과전압에 의해 각 재료에 따라 약간의 가공정도의 차이가 나타남을 볼 수 있다. 과전압은 다음과 같은 (Tafel)식으로 표현 된다.^{(3),(5)}

$$U_{pol} = a + \log J \quad (5)$$

$$a = -\frac{2.303RT}{z\alpha F} \log J_0; b = \frac{2.303RT}{z\alpha F}$$

R : gas constant
 a : transfer coefficient

J_0 : exchange current density

이러한 관계식에서 전극과 공작물 사이의 간격이 매우 작을 경우에는 분극전압(Polarization voltage)값이 더 이상 일정한 값으로 나타내어지지 않는다. 위의 식을 바탕으로 PEMM가공시의 전류밀도는 다음과 같이 나타낸다.

$$J = \frac{(U_{proc} - a)k}{(h + bk)} \quad (6)$$

ECM가공시 전류밀도에 의해 가공량이 결정 되기 때문에 이 파라메타가 가장 중요한 요소라고 볼 수 있다.

또한, 전극에 전원이 공급되어 가공되어질 때 가공물의 모서리 부분이 더 많이 가공 됨을 볼 수 있다. 결과적으로 이 부분에서 전위차가 크기 때문에 발생된 현상이다.

2.3 전극과 공작물사이의 간극 구조

패러데이의 법칙에 의해 펄스전압이 주어지고 전극의 feed-rate가 적용되지 않을 때의 통전구간(on-time)량은 다음과 같다.⁽²⁾

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Ak(U_{proc} - U_{pol})}{hz\rho F} \quad (7)$$

펄스 가공시의 전극 간극 상태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$\int_{\tau_{on}}^{\tau_{off}} h dh = \int_{\tau_{on}}^{\tau_{off}} \frac{Ak(U_{proc} - U_{pol})}{z\rho F} dt \quad (8)$$

이 때, 펄스전원을 이용한 PEMM가공시 전극 간극은 on-time일때만 전해작용이 진행되므로, 이 때만 가공이 증가함을 알 수 있다. 가공시간 t 가 off-time시간대에서는 전해작용이 발생하지 않으므로 전극간극은 그대로 유지되며, 다음 on-time시간대에서 다시 전극간극이 증가하게 된다.

일반적으로 펄스전원을 사용할 경우에는 각각의 조건구분을 위해 duty factor를 적용하는데 이는 다음과 같이 정의된다.

$$Dutyfactor = \frac{\tau_{on}}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (9)$$

펄스가공에 있어서 duty factor에 의해 가공특성이 결정되는 것으로 인식될 수 있으나, 실제 가공시

에는 동일한 duty factor를 가지는 전원 조건인데도, 서로 다른 결과를 보임을 알 수 있다.⁽²⁾ 일반적으로 동일한 duty factor에서는 on-time값이 클수록 가공 효율이 증가한다. 이와 같은 현상은 두 가지의 이유로 발생됨을 알 수 있다. 이것은 on-time값이 크면, 가공간극이 더 증가함을 알 수 있다. 또한 on-time시 전극봉에 흐르는 전류는 전극봉 등, 시스템의 인덕턴스에 의하여 전류가 바로 수직 상승하는 것이 아니고, 고주파 펄스에 의한 충전 현상 때문에 전류가 지연되어 지수함수 형태로 전류가 흐르게 된다. 따라서 on-time값이 작을수록 총 가공시간은 동일하지만, 실제 가공에 사용된 전류량(전류밀도)은 작아지게 된다.

이번 시뮬레이션에서는 이런 시정수(time-constant)의 개념을 도입하지 않고, 최대값으로 하여 계산하였지만, 추후 여기에 대한 보정이 필요할 것이다.

3. 실험값과의 비교 및 고찰

다음과 같은 결과에서처럼 미소 간극의 펄스 가공에서 불안정한 과전압 값에 의해 전류밀도 값은 많은 차이가 나타나고 있으며, 실제로 시뮬레이션 적용시 실제값과 다른 결과가 나타남을 알 수 있다.

Table 1 Experimental conditions.

voltage	4.5V	electrolyte	NaNO ₃ (30%)
gap	0.1mm	duty	30/300μ sec
temperature	293K	machining time	STS304 : 100s
			A6061 : 15s

Table 2 Simulation value of groove depth(μm).

	experimental value	using Equ(4)	using Equ(6)
A6061	15	24.73	16.78
STS304	30	56.61	45.07

시뮬레이션과 실험값을 비교해 보았을 때, 실제로 미소 간극의 펄스 가공시에는 과전압 값이 더 이상 일정한 값을 가지고 있지 않음을 보여 주고 있다.

또한 위의 결과에서 알 수 있듯이 A6061재료의 가공효율이 STS304재료보다 가공효율이 높음을 알 수 있다.

위의 전류밀도 식을 바탕으로 duty factor의 변화, 가공간극의 변화, 가공시간의 변화에 따른 실험값과 시뮬레이션 값을 비교해 보았다.

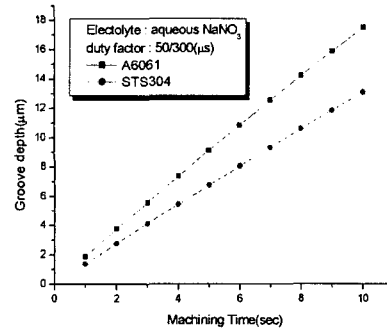


Fig. 1 Variation of machining depth according to increase of machining time(simulation)

Fig. 1은 A6061재료와 STS304재료의 가공시간에 따른 가공깊이를 시뮬레이션 값을 나타내고 있다. 이와 같은 시뮬레이션으로 가공조건에 따라 가공깊이를 시간에 따라 예측해 볼 수가 있게 된다.

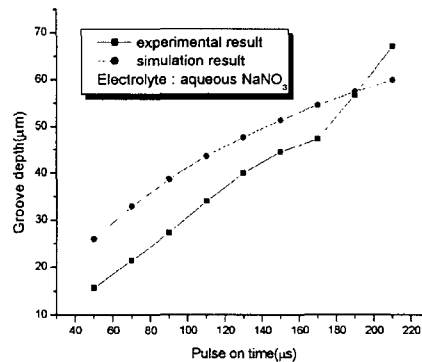


Fig. 2 Variation of machining depth according to increase of pulse on time

Fig. 2은 off-time이 200μ m일 때, A6061재료의 가공량의 변화를 비교한 것이다. on-time값이 off-time보다 작을 경우에 대체로 실험값과 시뮬레이션 값을 알 수 있으며, 가공효율을 100%라고 가정하였기 때문에 실 측정치가 이론적 수치보다 대체적으로 적은 경향을 보이고 있다.

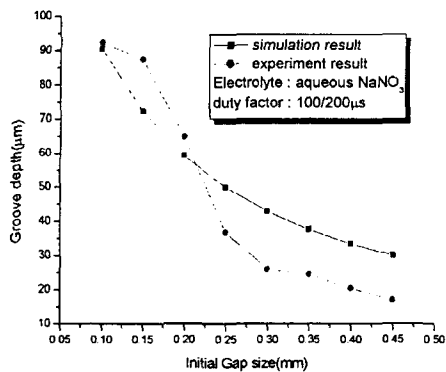


Fig. 3 Variation of machining depth according to increase of initial gap size

Fig. 3는 전극간극에 따른 그루브의 가공깊이를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 실험값과 시뮬레이션값이 유사한 경향을 나타내고 있으며, 간극이 증가함에 따라 시뮬레이션 결과에서는 루트(root) 곡선을 그리며, 감소함을 볼 수 있다.

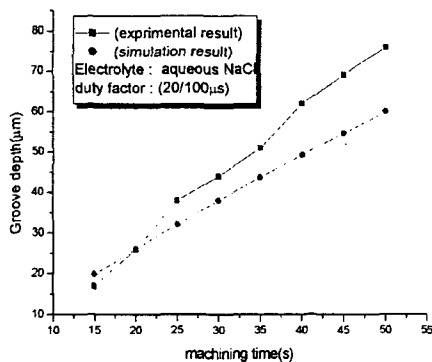


Fig. 4 Variation of machining depth according to increase of machining time

Fig. 4은 전해액을 NaCl용액으로 사용하였다. 시뮬레이션과 실험값이 유사한 경향을 보이고 있으나, 실험값이 더 많이 가공 됨을 알 수 있다. 이는 NaCl 용액을 사용하였을 경우, 공작물 표면에 부동태 층을 잘 형성하지 않으므로, 지속적인 전기화학 반응에 의한 전해제거량이 증가하여, 이로 인해 가공면이 NaNO_3 보다 좋지 못한 결과를 가지게 된다.

위의 같은 시뮬레이션으로 가공 전 여러 가공 조건에 따른 가공 깊이 등을 예측하여 가공환경을 개

선할 수 있다. 실제로 다이내믹 베어링의 그루브 가공시 이를 바탕으로 가공능률을 높이고 있다.

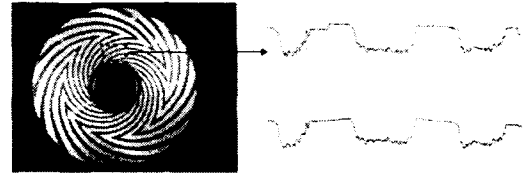


Fig. 5 A case of groove machining

5. 결론

전해가공의 여러 파라미터를 이용하여 전해가공의 가공특성을 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 미세전극의 펄스가공 시에는 과전압 값이 일정하지 않아서, 그 결과값이 달라지며, 과전압에 따라 가공의 결과가 달라짐을 알 수 있다.
2. 전류밀도가 가공량을 결정하는 중요한 파라미터이며, 이는 과전압과 전극간의 간극, 전해액의 비전도성에 의해 결정이 되므로, 가공시 이 파라미터의 정확한 이해가 필요함을 알 수 있다.
3. 전해가공의 파라미터를 시뮬레이션 하여 가공 전 그 결과를 예측하여, 가공 환경을 개선 할 수 있다.

참고문헌

1. 박정우, 이은상, 문영훈, "미세 홈 형성을 위한 마이크로 전해가공에 관한 연구," 한국정밀공학회 논문집 제19권, 제4호, pp. 101-108, 2002.
2. J. W. Park, E. S. Lee, Development of Electrochemical Micro Machining for Air-Lubricated Hydrodynamic Bearings, 12th annual symposium on ISPS, ASME, 2000.
3. McGeough, J.A., "Principles of Electro-chemical machining," Chapman Hall, London, 1974.
4. A.K.M. De Siver, H.S.J. Altena, J.A. McGeough, "Precision ECM by process Characteristic Modelling," Annals of the CIRP, Vol 49/1, pp.151-155, 2000.
5. 남중우, "현대의 전기화학," 청문각, 1995.